기초 자료가 부족한 배수 펌프장 상류 유역의 침수 재현 모의 Inundation Simulations for the Upstream Watershed of a Drainage Pump Station Lacking Basic Data

진영규* · 이상호** · 장호식*** · 이영대****

Jin, Youngkyu*, Lee, Sangho**, Jang, Hosik***, and Lee, Youngdae****

Abstract

It is difficult to obtain basic input data necessary for flooding simulations in small streams. Flooding simulations were performed for a watershed that lacked the basic input data for the simulations. The simulation results were verified based on the data stated by the residents. The study area was the upstream watershed of the Jeungsan pumping station. The PCSWMM was applied to the flooding simulations. A drone survey yielded detailed digital elevation models for the wide area of interest and stream cross sections. The pump curve of depth-discharge is an important element in the simulation model, and it was inversely estimated by the trial-and-error method based on the pump operation records. Jeungsan field was inundated by 20 cm to 30 cm of water at the time of Typhoon Chaba, and the simulation results produced an average inundation depth of 23 cm. The difference between the recorded data and simulated results of the volume of water pumped through the drainage pump station was about 0.5% until the end of the operating time. This input data collection and advanced technology might produce reliable flooding simulation results for a watershed with similar status.

Key words : flooding, drone, pump station, PCSWMM, Chaba

요 지

기초 자료가 부족한 소하천 및 그 보다 작은 하천에서는 침수 모의에 필요한 기초 자료를 획득하기가 어렵다. 본 연구에서는 기초 자료가 부족한 유역에 대하여 침수 상황을 재현하고, 주민들에게 탐문한 자료를 바탕으로 모의 결과를 검증하였다. 연구 대상 지역은 증산 배수펌프장 유역이며, 침수 모의는 PCSWMM을 이용하였다. 침수 지역에 대한 상세한 수치표고모형 및 하천 단면 자료를 구축하기 위해 드론을 이용한 측량을 수행하였다. 모형의 중요한 입력자료인 수심-양수량 곡선은 기록된 펌프 운영 자료를 기준으로 시행착오법을 통하여 역추정하였다. 태풍 차바 당시 증산들의 침수심은 약 20~30 cm이며, 모의 결과에서 평균 침수심은 약 23 cm로 나타났다. 증산 배수펌프장을 통하여 배수된 물의 양에 대한 기록 자료와 모의 결과의 차이는 모형에서 펌프 모의 운영 종료 시점까지 약 0.5%이다. 고도화된 기술을 포함한 위의 입력자료 구축방법은 기초 자료가 부족한 유사 유역의 정교한 침수 모의에 유용하게 활용될 수 있으리라 판단된다.

핵심용어 : 침수, 드론, 배수펌프장, PCSWMM, 차바

*정회원, 부경대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: accvn75@gmail.com)

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

**교신저자, 정회원, 부경대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-51-629-6076, Fax: +82-51-629-6063, E-mail: peterlee@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

***지오스페이스이엔지 대표이사

CEO, Geo Space ENG

****부경대학교 토목공학과 명예교수

Professor Emeritus, Department of Civil Engineering, Pukyong National University

1. 서론

우리나라에서 최근 호우로 인한 주거지 또는 농경지 침수는 국부적으로 발생하는 경우가 많다. 그리고 침수를 일으킬 정도의 강한 강우가 발생할 지역을 미리 예상하기가 매우 어렵다. 한국수문조사연보에 따르면 2016년 현재 699 개소에서 하천 수위를 관측하고 있다. 그렇지만 지표 침수의 국부성과 침수 지역 예상의 한계로 인하여 침수의 재현모의에 직접 사용할 수 있는 수위 자료는 매우 희소하다. 더욱이 국부적 침수 지역을 흐르는 하천은 소하천이나 이름 없는 하천(무명천)인 경우가 많다. 소하천은 개수가 매우 많으므로, 하천기본계획으로 관리하는 국가하천이나 지방하천과 달리, 관할 지자체와 행정안전부가 자금을 투입하여 이들을 관리하기에 한계가 있다. 따라서 소하천이나 무명천의 하천 단면이나 하천 유량 자료는 없는 경우가 많다. 또한 지반고 자료도, 국토지리정보공사가 제공하고 있음에도 불구하고 정확성이 떨어지는 경우가 있다.

경상남도 양산시 물금읍 증산리 일원의 증산 배수펌프장 유역 농경지(이하 증산들)는 2016년 10월 5일 태풍 ‘차바’에 동반된 호우에 의하여 침수되었다. 증산들에 발생한 침수를 재현 모의하는데 필요한 자료는 강우량, 펌프 배출 유량, 펌프장의 유수지 제원, 지반고, 하천 단면, 농수로 단면, 접속 도시 유역의 하수도 제원 등이지만, 이 중에서 여러 자료가 존재하지 않거나 큰 오차가 있다. 즉, 유역 내 하천인 새도랑천은 소하천으로도 등록되어 있지 않으며 새도랑천의 하천 단면은 존재하지 않았다. 유역 말단에 위치한 펌프장의 펌프는 가동 개수와 시간만 기록되어 있을 뿐이고 펌프장 유수지의 수위는 관측되지 않았다. 지반고는 농경지 구획당 하나 존재하는데 이마저도 새도랑천 인접 지역은 수십 cm의 오차가 있었다. 이와 같이 침수 모의에 필요한 기초 자료가 현저히 부족한 지역에 대하여 자료들을 구축하는 과정과 이를 이용한 침수 재현 모의 과정 및 결과를 본 논문의 내용으로 기술하고자 한다.

국내·외에서 침수상황을 모사하기 위해 모형을 개발하거나 적용한 사례가 있다. 국내에서는 XP-SWMM을 이용하여 침수분석을 한 연구들이 있다. 예를 들어 Yoon (2017)은 기후변화 시나리오에 대한 빈도 강우를 생성한 후, XP-SWMM을 이용하여 기후변화 시나리오가 반영된 빈도 강우별 도시지역 침수해석을 수행하였다. Jeong (2015)은 해수위에 따른 해안가 도시지역의 침수 영향 분석을 위해 XP-SWMM을 이용하였다. 위 연구들의 한계는 침수의 검증이 전혀 이루어지지 않은 점과 침수 모의 모형이 경우에 따라 불안정한 점이다. XP-SWMM은 맨홀을 통하여 분수된 물의 지표면 흐름을 TUFLOW로 계산한다. 그런데 저자들의 경험에 의하면, XP-SWMM에서 TUFLOW를 이용한 지표면 흐름 계산은 입력조건에 따라 결과가 발산할 경우가 많이 있다. 예를 들어, 계산 시간 간격에 따라 상이한 결과가 도출될 뿐만

아니라 유량 경계 조건을 사용할 경우에 입력한 값에 따라 실행이 불가능하거나 불합리한 결과가 도출될 수 있다.

단일 모형을 적용한 연구 외에 두 가지 모형을 결합하여 침수분석을 한 연구 사례도 있다. Kim (2009)은 HEC-GeoRAS를 이용하여 하천의 범람으로 인한 재내지의 침수 모의 결과를 도출하였다. HEC-GeoRAS에는 유역 유출 모의를 할 수 없는 한계가 있으므로, 유역 유출 모형에서 모의된 결과를 입력자료로 활용하여야 된다. 또한, 복잡한 하수관거 체계를 가진 유역에 대해서 적용이 어렵기 때문에 하천 인근에만 적용가능한 한계가 있다. Kang et al. (2010)은 SWMM과 FLUMEN을 연계하여 복잡한 지형을 가진 도시지역의 홍수 시 배수불량에 대한 침수분석을 하였다. Choi (2017)은 GIS 기법으로 생성된 수치자료와 홍수자료를 활용하여 FLUMEN으로 저지대 침수분석을 하였다. 두 연구는 2차원 모형을 이용하여 지표면 흐름이 정밀하게 모의 가능함을 보여주었으나, 홍수 이후 하천 수위 및 우수 관거 내의 수위 하강에 따른 범람된 물의 재유입에 대한 고려가 되지 않은 한계가 있다.

앞서 제시된 바와 같이 개발된 모형을 적용하는 연구 외에 유역 유출 및 지표면 흐름 모형을 개발하여 적용한 연구도 있다. Lee and Yoon (2017)은 천수방정식을 지배방정식으로 한 격자기반 침수해석모형을 개발하여 도시 침수 분석을 하였다. 이 논문에서는 건물의 지하공간 유입 및 증발에 의한 손실, 범람수의 맨홀 재유입을 고려하지 못하는 점, 정방형의 격자만 생성가능하다는 한계가 있다.

본 연구에서는 1차원 점변 부정류식으로 준 2차원의 침수 모의가 가능한 CHI 사의 PCSWMM을 이용하여 침수분석을 수행하였다. PCSWMM은 1차원식을 이용하여 모의하기 때문에 모의 결과가 거의 발산하지 않는다. 또한, 범람수의 관거 재유입 및 건물을 고려할 수 있다.

2. 연구방법

2.1 대상유역

국가하천 및 지방하천은 주기적으로 ‘하천 정비 사업’을 실시함으로써 설정된 빈도 유량 내에서 하천 범람에 의한 침수 피해를 예방하고 있다. 또한, 소하천으로 지정된 하천의 경우에도 ‘소하천정비종합계획’에 따라 하천 정비를 하고 있다. 소하천에 지정되지 않은 하천은 하천법 및 소하천과 관련된 법에 적용을 받지 않고 있으며, 이로 인해 하천 정비가 미진하고 하천과 관련된 자료들이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 경상남도 양산시 물금읍에 위치한 증산 배수 펌프장 유역을 대상으로 2016년 10월 5일의 태풍 ‘차바’에 의한 침수 상황을 물리적 모형으로 재현하고자 한다. 모의하고자 하는 대상 유역의 위치도는 Fig. 1과 같다. 증산 배수 펌프장 유역의 유역 면적은 2.47 km²이다. 새도랑천 좌안에 위치한 양산 신도시(B4)로 내린 강우는 증산 저류지

로 배수되며, 증산 저류지(S1)의 물은 3.0×2.5 m의 2련 암거를 통해 새도랑천(J2)으로 합류된다. 양산 신도시의 일부 유역(B2)은 1.5×1.5 m의 암거를 통해 새도랑천 상류(J1)로 합류가 된다. 증산과 증산아래 마을 유역(B1)에서 발생한 유출수는 무명천(nameless stream)으로 유입된다. 증산들(B3, B5)의 유출수는 논·밭의 배수로를 따라 새도랑천으로 유입이 된다. 새도랑천으로 유입된 유출수는 증산 배수 펌프장의 유수지에 저류되며, 펌프를 이용하여 양산천으로 배수된다. 증산 배수 펌프장 유역의 유출 체계는 Fig. 2와 같다.

Fig. 1. Jeungsan Drainage Pump Station Basin

Fig. 2. Schematic Diagram of Runoff for Jeungsan Drainage Pump Station Basin

2.2 기초자료 구축방법

2.2.1 무인항공기(drone)를 이용한 사진측량

강우로 인한 침수 상황을 수학적 모형으로 재현하기 위해서는 대상 지역에 대한 상세한 지형자료가 필요하다. 증산 배수 펌프장 유역에 대한 수치 지도는 2004년에 제작된 1:1000 도와 2018년에 제작된 1:5000 도가 있다. 축척이 1:1000인 지도는 제작 연도가 오래되어 2016년의 대상 유역에 대한 정확한 지반고를 파악하기 어렵다. 1:5000 지도는 경작지 및 요철이 심한 전원 지역에 대해서 침수 분석 시 활용될 수치 표고 모형을 제작하기에는 해상도 측면에서 부적합한 것으로 판단된다. 또한, 대상 지역의 경우에 새도랑천 및 무명천의 하천 단면 자료가 전무하다. 본 연구에서는 침수 분석 시 활용할 수 있는 측량 자료를 확보하기 위해서 침수 지역 및 침수 인근 지역의 지반고를 대상으로 드론 측량을 하였으며, 대상 유역의 하천수를 강제 배수할 수 있는 점을 활용하여 배수 후 하천 단면 자료도 드론 측량을 통하여 획득하였다.

드론 측량은 디지털영상을 이용하여 대상지역을 3차원으로 측량할 수 있는 첨단기술이다. 드론 측량을 이용하여 측량하는 방법은 영상취득만 항공사진 측량 방법과 다를 뿐이고, 그 이후 해석은 항공사진측량과 동일한 이론 및 과정을 적용한다.

본 연구에서 사진 측량 시 사용한 드론과 카메라의 제원은 Tables 1과 2에 제시하였다. 드론 측량은 2017년 12월 12일에 실시되었고, 비행고도는 약 150m 정도를 유지하여 촬영하였다. 지상기준점(ground control point, GCP)은 12개소를 배치하였고, 대상지역 전반에 골고루 배치하여 촬영하였다.

촬영된 영상으로 영상정합을 하고, 광속조정법(simultaneous bundle adjustment)을 이용하여 대상지역의 3차원 위치를 해석하였다. 사진측량 결과를 이용하여 제작한 정사영상지도는 Fig. 3과 같으며, GCP를 설치한 12개의 측점에서 수평 평균오차는 $\pm 0.0043 \sim 0.0125$ cm, 수직 평균오차는 0.0763 cm 정도이다. 이는 일반측량작업규정(국토지리정보원) 제15조에 규정한 지상 측량 방법에 의한 수평위치 정확도 ± 10 cm, 표고의 정확도 ± 10 cm 이내이므로 충분히 정확하다고 판단된다.

2.2.2 현장 조사

대상 유역에서 주로 침수로 인한 피해가 발생한 지역은 논·밭 및 비닐하우스가 있는 들판이다. 논·밭의 경우에는 침수로 인한 피해가 크지 않으나, 특용작물을 재배하고 있는 비닐하우스는 20~30 cm의 침수에도 큰 피해를 입는다. 본 연구에서는 하천의 범람 뿐만 아니라 경작지 배수로의 내수배제 불량을 모의 하고자 증산들 내에 있는 배수로를 조사하였다. 증산들 내부에 있는 배수로는 주로 기성콘크리트 수로로 이루어져 있으며, 구간에 따라 퇴적 토사와 퇴적토 상부에 자라난 수로 내의 잡초로 인해 통수단면이 잠식되어 있었다.

Table 1. The Drone Specifications Used in Study

Classification		Specification	Note
Model		Phantom 4 Pro+
Manufacturer		DJI	
Specifi- cation	Weight	1,388 g	
	Max Speed	P mode: 50 km/h	
	Max Altitude	Elevation: $\leq 6,000$ m	
	Flight Time	$\leq$ about 30min	
	Vision Positioning	Verticality: ± 0.1 m	
		Horizontality: ± 0.1 m	

Table 2. The Camera Specifications Used in the Study

Classification		Specification	Note
Model		Phantom 4 Pro+
Manufacturer		DJI	
Specifi- cation	Resolution	5472×3648	
	Lens	24 mm	
	F-Stop	FOV (Field of View) 84° , 8.8 mm / 24 mm (35 mm conversion)	
	FOV	94°	
	ISO	100~3200 (automatic)	
		100~12800 (manual)

Fig. 3. Orthophotomap of Jeungsan Field

새도랑천은 하폭이나 연장을 고려할 때 소하천의 규모를 가지지만, 하천정비와 유지관리가 이루어지지 않은 상태이며, 단지 사다리꼴 형태의 개수로 기능을 하고 있었다.

무명천은 새도랑천의 시점을 향하여 유하하고 있다. 무명

천 수로바닥과 양쪽 비탈면에는 토사가 퇴적되어 있거나 및 수초와 잡초들이 무성하게 자라있고, 일부 구간에는 생활 쓰레기와 농사부산물 등이 산재해 있어 통수단면과 수로의 조도계수를 높여 물의 흐름을 방해하고 있었다.

특히, 용수로와 배수로가 개수로 형태로 상하로 평면교차(용수로가 배수로 단면을 잠식)함으로써 용수로가 배수로의 통수단면을 현저히 잠식한 상태이다(Fig. 4). 이 때문에 태풍 차바와 같은 집중호우 시에는 배수로(무명천)흐름이 방해를 받아 용수로가 무명천의 흐름에 배수효과(back water)를 발생시켜 무명천의 물이 논두렁을 월류하여 증산들에 침수 영향을 가중시키는 역할을 하였다.

2.3 모형 선정

모형을 선택할 때는 연구의 목적, 가용자료의 수준, 적용 대상유역, 모형의 취득 가능성 등이 고려되어야 한다. 또한, 모형의 한계와 특성에 대한 면밀한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 많은 홍수 유출 모형들 중 캐나다 CHI사에서 Storm water management (SWMM)이 사용하는 수리/수문 해석 엔진을 기반으로 하여 Windows용 사용자 편의환경을 도입해 개발한 유역 유출모형인 PCSWMM을 적용 모형으로 선정하였다.

(a) Example of encroached cross section on the nameless stream

(b) A-A' cross section

Fig. 4. Example of the Field Survey about Cross Section on the Nameless Stream

PCSWMM의 해석 엔진의 기반인 SWMM은 유역의 강우에 의한 홍수량을 산정하기 위하여 1971년에 미국 EPA의 지원아래 개발된 모형으로서, 도시유역 하수시스템 내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 구성되어진 유역 유출모형이다. SWMM은 강우주상도, 기상자료, 소유역의 자료, 하수관로자료를 입력하여 유역의 유출 유량과 수질을 예측하고, 오염물질에 대한 처리를 모의할 수 있다. SWMM은 단일·연속강우와 용설에 의한 유출모의를 수행할 수 있다. 연산시간 간격은 강우사상에 대해 임의조절이 가능하다. 유출은 강우와 용설로 인하여 발생하고 지표유출은 비선형 저류방정식을 사용하여 추적하며, 침투량 산정에는 Horton 또는 Green-Ampt 식을 사용한다(Lee et al., 2011).

PCSWMM에 대해 간단히 설명하면, PCSWMM은 SWMM과 마찬가지로 단일 강우나 연속 강우의 모든 경우에 적용이 가능하다. 또한, PCSWMM은 사용자의 편의성, 시각화의 우수성, 측량자료 입력의 편의성, 민감도 분석, 튜닝 기법의 모형 보정, 침수 분석 등의 장점을 가지고 있기 때문에 전 세계적으로 많은 사용자를 활용하고 있다. PCSWMM은 GIS 및 CAD 파일을 불러올 수 있으므로 유역의 토지이용도, DEM (digital elevation model; 수치 고도 모형)자료 등을 이용한 모형 구축이 용이하다. 또한 구글 어스와 연동하여 모의하고자 하는 유역에 대한 가시화 영상을 볼 수 있다.

과업에서 선정한 홍수 유출 모형인 PCSWMM의 경우 침수 해석을 위해 연속방정식과 1차원 점변 부정류식을 사용하고 있다. 침수에 대한 수치 해석 시 모의하고자 하는 영역에 대하여 사용자의 정의에 따라 육각형의 격자를 생성하고, 격자의 중심에 각 격자의 평균 고도를 맨홀 바닥고로 하는 노드(node)를 생성하게 된다. 그 후, 각 노드를 연결하는 자유수면의 개수로 흐름을 연속방정식과 1차원 점변 부정류방정식으로 모의하되, 육각형의 여섯 방향으로 모의하여 평면의 침수 해석을 수행한다. 해석 결과로서 각 노드의

수위와 하도의 유속을 알 수 있다.

3. 침수분석

3.1 PCSWMM 구축

태풍 ‘차바’ 내습 시 증산 배수 펌프장 유역에 대한 침수양상을 분석하기 위해 유역 면적 2.47 km²의 대상 유역을 Fig. 5와 같이 소유역 94개로 분할하고 유역의 자료를 PCSWMM에 입력하였다. 유역 분할에 사용하거나 참조한 자료는 LH공사의 물금신도시 실시설계보고서(Korea Land and Housing Corporation, 2008), 수치지형도, 현장조사 자료(신도시 우수관거, 증산들 배수로, 황산로 우수관거 등)이다. Fig. 6은 증산들의 침수 모의(시뮬레이션) 모형을 구축한 화면으로서, 새도랑천과 무명천, 배수로를 포함하여 침수 모의 격자를 나타내고 있다. 2차원 침수모의를 위해 생성된 격자의 수는 총 4188개다. 모형에 입력한 강우량 자료는 양산 자동기상관측소의 10분 단위 자료를 활용하였으며, 태풍 ‘차바’ 당시 양산 자동기상관측소에 측정된 총 강수량은 277 mm이다.

Fig. 5. Subbasins of Jeungsan Drainage Pump Station Basin

Fig. 6. Constructed 2D Mesh on the Jeungsan Field using PCSWMM

새도랑천 및 무명천의 하천 단면은 새도랑천의 물을 완전 배수한 후 수행한 드론 측량 결과를 활용하여 입력하였다. Table 3은 SWMM의 입력자료로 이용하도록 미환경청에서 제공하고 있는 자연 하천의 조도계수이다. 새도랑천은 하천

바닥의 굴곡이 심하고, 하안 사면에 수초 및 나무들이 많은 것을 고려하여 조도계수를 0.05로 입력하였다. 무명천은 하폭이 2~4 m로 좁을 뿐만 아니라 잡초 및 나뭇가지들이 물의 흐름을 방해하고 있는 것을 고려하여 조도계수를 0.07로 하였다.

증산 배수 펌프장의 운전원에 따르면 태풍 차바 시 펌프가동을 중지하는 최저수위는 약 El. -1.0 m, 당시의 최고수위는 약 El. 1.2 m 정도로 추정된다.

증산들에서 유출되는 물은 자연 배수 없이 전량 증산 배수장에서 강제 배수된다. 보통 모형의 출구(outfall)에서 경계조건으로서 수위 시계열, 등류 조건, 한계 수심 조건 등을 입력하나, 본 연구의 경우는 자유흐름 조건(free: 한계 수심 또는 등류 수심 중 작은 값)을 적용하였다. 그렇지만 본 연구에서 하류 단의 흐름을 결정하는 요소는 출구 직상류에 설치된 펌프장의 수심-양수량 관계이다. 수심-양수량 관계는 증산들 침수 당시의 양수기 가동일지 자료(Table 4)를 참조하여 시행착오를 거쳐 결정되었다. 추정된 수심-양수량 곡선은 Fig. 7에 나타내었다.

Table 3. Historical Data on the Operation of the Jeungsan Drainage Pump Station During the Typhoon Chaba

Article	Pump 1		Pump 2		Pump 3		Pump 4	
	operation	stop	operation	stop	operation	stop	operation	stop
First	05:00	07:00	08:30	17:00	09:00	17:00	08:30	18:00
Second	09:00	16:30			20:00	21:00	20:00	21:00
Operating time	9h 30min		8h 30min		9h		10h 30min	
Total time	- 4 pumps total accumulated time 37h 30min (2250 min)							
Total pumping discharge	- 2250 min (37h 30 min) $\times$ 225 m ³ /per pump (900 m ³ /4 pumps) = 506,250 m ³							
Total rainfall (volume)	- 2.47 km ² $\times$ 1000,000 m ² /km ² $\times$ 277 mm/1000 mm/m = 684,190 m ³ - Pumping volume divided by rainfall amount = 506,250/684,190 = 0.7399 $\approx$ 0.74(only considering pumping volume except discharge stored under the catchment and stream channel)							

Table 4. Manning's Roughness Coefficients (U.S. Environmental Protection Agency, 2017)

Type of channel and description	Minimum	Normal	Maximum
Natural streams - minor streams (top width at flood stage < 100 ft)			
a. clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. clean, widening, some pools and shoals	0.033	0.04	0.045
d. same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. same as 'd' with more stones	0.045	0.050	0.060
g. sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150

Fig. 7. Pump Curve of the Jeungsan Pump Station Inputted to the PCSWMM Model

3.2 침수 모의 결과

Table 5는 침수 모의 결과 침수심과 관련된 사항을 제시한 것이다. 평균 침수심은 0.226 m이고 최대 침수심은 0.800 m이며 침수 면적은 0.562 km²이다. 모의된 평균 침수심은 당시에 약 0.2-0.3 m 었다는 탐문조사와 잘 부합되는 결과이다. Fig. 8은 증산들의 최대 침수 상황을 재현 모의한 것으로서, 당시의 침수 지역과 거의 일치하는 결과이다. Fig. 9는 주요 시점별로 침수 발생 상황을 나타낸 것이다. Fig. 10은 증산 저류지 박스 토출부와 새도랑천 합류부 주변의 수문곡

선들을 나타낸 것이다. 가운데 그림은 합류부 직상류의 새도랑천 유량 수문곡선으로서, 유량이 양수에서 음수로 급격히 감소하였다가 다시 양수로 증가하는 것을 볼 수 있다. 음수의 유량은 역류를 의미하는데, 이는 증산 저류지를 통해 유입된 물이 새도랑천 상류로도 흘렀음을 나타낸다.

Table 5. Simulated Results

Index	Simulation results
Maximum flood depth	0.800 m
Average flood depth	0.226 m
Flood area	0.562 km ²

Table 6은 침수 상황 재현 모의의 증산 배수 펌프장 운영 양수량과, 기록된 펌프 가동 시간으로 추정한 양수량을 비교한 것이다. 모형에서 펌프장 모의 시 입력한 수심-양수량 관계 자료는 시행착오법으로 추정하였다. 가장 작은 수심과 그에 상응하는 양수량을 결정한 과정은 다음과 같다. 유역 유출로 인한 유수지의 모의 수심 시계열 중 실제 펌프 가동 시각의 수심을 선택하고 그에 해당하는 양수량 펌프 가동 대수로 추정하여, 수심-양수량의 자료쌍을 결정하였다. 하나의 수심-양수량 자료쌍을 결정한 후 보다 깊은 수심에 대한

Fig. 8. Simulated Results of Maximum Inundation Depth Around Jeunsan Field

Fig. 9. Major Flooding Stages by Time

Fig. 10. Discharge Hydrographs Around the Junction (J2) of the Culvert from Jeungsan Detention and the Saedorang Stream

Table 6. Comparison of Total Pumping Volume of Historical Data and Simulation Results

Item	Total pumping volume (m ³)	Differences between simulated results and historical data (%)
Simulation result	477,090	-
Historical data (2016-10-5 00:00~24:00)	506,250	5.8
Historical data (2016-10-5 00:00~20:00)	479,250	0.5

Fig. 11. Simulated Water Levels of the Jeungsan Pump Station

양수량을 결정하는 과정을 반복하여 최종 수심0양수량 관계 자료들을 결정하였다. 펌프 가동 기록으로부터 역추정한 수심-양수량 관계는 PCSWMM에서 고정되어 적용되지만, 실제 상황에서 펌프 운전원은 고정된 수심-양수량 관계와 유사하게 유수지 수심을 감안하여 펌프를 가동한다. 구체적인 예를 보면, Table 3에서 18시에 펌프 가동이 중단된 후 20시에 펌프를 재가동하였음을 볼 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 Table 6과 같이 두 가지의 경우에 대하여 비교하였다. 2016년 10월 5일 하루 동안 기록된 양수량의 추정값과 모의 결과의 차이는 5.8%이다. 모형은 펌프장 수위가 강하하여 당일 20시에 펌프 가동을 중단한 후 다시 가동하지 않았으므로, 0-20시 사이의 기록 양수량 추정값과 모의값을 비교할 경우 차이는 0.5%로 미미하다. Figs. 11과 12는 침수 상황 재현 모의 시 증산 배수펌프장 모의 수위 및 양수량 시계열이다. 모의된 침수심과 탐문조사된 침수심의 차이가 작고 증산 배수 펌프장의 모의 양수량과 실제 양수량 추정값의 차이도 작으므로, 모의 결과는 태풍 ‘차바’로 인한 실제 침수 상황을 적절히 재현한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유역 유출 및 침수 분석을 하기 위한 기초 자료들이 부족한 배수 유역에 대하여 어떻게 소요 자료들을 구축하였는지 제시하였고, 그 자료들을 사용하여 침수 모의 한 결과가 실제 상황과 어느 정도 부합하는지 기술하였다. 증산 배수펌프장 유역에 대한 드론 측량의 결과는 새도량

Fig. 12. Comparison of Pumping Discharges Between Historical Data and Simulation Results

천 및 무명천의 하천 단면과, 지반의 상세한 수치 표고 모형을 구축하기 위한 용도로 사용되었다. 그 외 유역 내 논·밭의 배수로, 저류지의 암거 규격 등은 현장 조사를 통하여 수집하였다.

유역 유출 및 침수 분석을 위한 모형으로서 PCSWMM을 사용하였다. 모형 구축 시 입력해야할 배수펌프장의 수심-양수량 곡선은, 증산 배수펌프장의 운영 기록과 유사한 모의 운영 결과가 도출되도록 시행착오법을 통하여 역추정하였다. 태풍 차바 당시 증산들의 침수심은 약 20~30 cm이며, 침수 분석 결과 평균 침수심은 약 23 cm로 모의 되었다. 증산 배수펌프장을 통하여 배수된 물의 양에 대한 기록 자료와 모의 결과의 차이는 펌프 모의 운영 종료 시점(2016년 10월 5일 20:00)까지 약 0.5%이다. 본 연구의 결과에는 펌프의 효율을 100%로 가정을 했다는 것과 배수 펌프장 수위를 배수 펌프장 운전원의 증언으로만 추정한 결과를 바탕으로 검증했다는 한계가 있다. 그러나 드론 측량 및 현장조사, 인위적 배수 기록을 활용한 펌프 곡선의 추정으로 생산된 양질의 입력자료로부터 모의된 결과는 실제 상황에 부합하도록 모의된 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 행정안전부 극한 재난대응 기반기술 개발사업의 일환인 “해안가 복합재난 위험지역 피해저감 기술개발 (연구과제번호: 2018-MOIS31-008)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Choi, H. (2017). A study on the inundation analysis of the Nam river lowland using GIS and FLUMEN. *Journal of the Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 25, No. 2, pp. 49-56.
- Jeong, S. (2015). *A study of assessment for flood inundation risk in coastal urban area using XP-SWMM*. Master's thesis, Ajou University.
- Lee, B.J., and Yoon, S.S. (2017). Development of grid based inundation analysis model (GIAM). *Journal of Korea Water Resource Association*, Vol. 50, pp. 181-190.
- Lee, S., Lee, J., Park, J., and Lee, K. (2011). *The fourth SWMM-GE workshop textbook*. Pukyong National University.
- Kang, T., Lee, S., Jung, T., and Oh, J. (2010). Inundation analysis for Suyeong · Mangmi lowland area using SWMM and FLUMEN. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 10, No. 5, pp. 149-158.
- Korea Land & Housing Corporation. (2008). *Yangsan Mulgeum land development business: Working design report*.
- Kim, C. (2009). *A case study of calculating flood inundation area by HEC-GeoRAS*. Master's thesis, Pukyong National University.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2017). *Storm water management model reference manual Volume II – Hydraulics*.
- Yoon, G. (2017). *A study on 2D inundation analysis in urban area considering climate change*. Master's thesis, University of Seoul.

Received	October 11, 2018
Revised	October 15, 2018
Accepted	October 22, 2018